



PnPnスイッチの研究

著者	傳田 精一
号	1
発行年	1964
URL	http://hdl.handle.net/10097/10950

氏 名	でん だ せい いち 傳 田 精 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 3 9 年 6 月 3 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 2 9 年 3 月 信 州 大 学 工 学 部 卒 業

学 位 論 文 題 目	P n P n ス イ ヅ チ の 研 究
-------------	-----------------------

論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授	西 沢 潤 一
	東 北 大 学 教 授	和 田 正 信
	東 北 大 学 教 授	吉 田 重 知
	東 北 大 学 教 授	高 橋 正

論文内容要旨

1 - 1 緒 言

最近の電子工学においては、情報処理技術が重要視されている。そしてこのような分野に於ては、電気的信号は、一般にパルスとして扱われており、主としてスイッチング動作をする能動素子が回路要素として用いられている。

スイッチ用素子としては非再生型（通常の増巾器）と再生型（自己保持作用をもつもの）とがあり、前者はトランジスタで代表されるが、後者は半導体内の各種の現象を利用する負抵抗素子である。

pnpn スイッチは現在広く用いられている SCR としての大電力用途の他に、小さい電力での応用に對しても大きい潜在的能力をもっていると考えられる。その動作状態は擬合型トランジスタ理論を延長して解釈でき、トランジスタ製造技術のほとんどが応用できる。著者の推測によれば、トランジスタと pnpn スイッチはその極限の形状、動作速度がほぼ同程度のものとなるであろう。

pnpn スイッチは最初シリコンを材料として製作された。その後、各種の pnpn 構造がシリコン及びゲルマニウムを用いて試作された。シリコンでは pnpn を作つただけで必ず負抵抗が生ずるが、ゲルマニウムでは何等かの操作を加えてやらないと特性がでない。

著者はこれを電流ドリフト効果、偏心効果、抵抗並列効果等を用いて解決し、いずれの方法によつても比較的よい特性が得られた。

電力用の素子を考える限りは、材料はシリコンがよいが、小電力、高速動作のスイッチ素子としては原理的にはゲルマニウムがすぐれている。本論文では pnpn スイッチを小電力、高速度スイッチ用素子として用いることを主眼として取扱っている。そしてベース領域を極度に薄くしていつでも確実に動作する。異なるアイデアのバイアス型三端子素子も取扱われている。この素子は更に技術の発達によつて高速動作を行いうる可能性を持っている。

以下、著者の開発した数種の pnpn スイッチの動作原理、製作技術、スイッチ特性等につき述べる。

1-2 pnpn スイッチの歴史とその意義

1956年に pnpn 構造が Moll 等によりスイッチ装置として発表された。

その後いくつかの改良された pnpn スイッチが発表された。1958年 Mackintosh が第3電極をつけてスイッチ特性を制御できるようにした。同年 Mueller はゲルマニウムの p 型オーム接触を使つて Thyristor を作つた。同じ年 Aldrich 及著者は中央部分の1つの領域が比較的長い構造では、電流増巾率の変化によつて特性が得られることを示した。前者はシリコン、後者はゲルマニウムを用いた。これを第3章にのべる。

著者は又エミッタ接合の1部を破壊して、実効的に抵抗成分を並列に入れてもスイッチ特性

を得ることを示した。これも第3章でのべる。

同年佐藤等はフック構造をもつたダブルベースダイオードで、pnpnと類似の特性を得た。これはフック増巾と伝導度変調機構を用いている。

1959年、Aldrich はエミッタ短絡構造、又Lesk はゲルマニウムで長いベース構造を作つた。これはいずれも著者のものと原理を同じくしている。

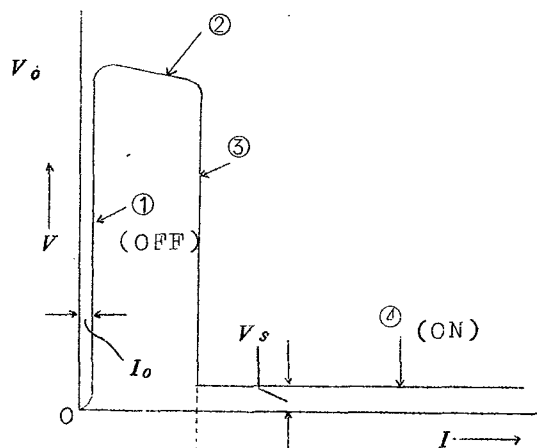
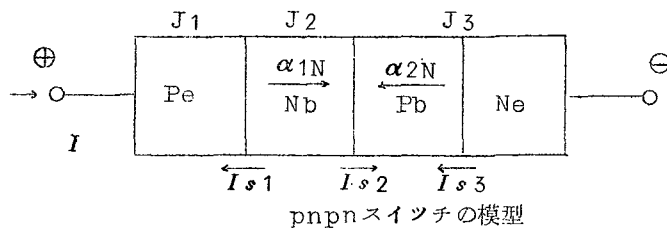
又著者はあらかじめ電流増巾率を大きく作つておいて、第3電極のバイアスで特性を制御する素子を作つた。これは特に高速動作に適して居り、第4章にのべる。

pnpnは現在低周波電力用応用に対して制御整流器として非常な発達をみせている。しかし小電力用スイッチに対しても、現在の高周波トランジスタと同程度の形状になれば、その動作速度もトランジスタと同程度になる筈であり、構造及それに関する製造技術の進歩、さらにこれを使用する回路技術者の努力が強く望まれる。

第2章 pnpn 構造の電圧電流特性

2-1 定義及一般式

第1図にpnpn スwitchの模型と定義、および典型的な電圧電流特性を示す。この特性のすべての領域に対して次の一般式が計算される。



第1図 pnpnスイッチの電圧電流特性

$$I_{s1}(e^{sv_1}-1) = \frac{[\gamma_2 M_p + (1-\alpha_2 N \alpha_2 I - \gamma_2) M_n] I_1 - \alpha_1 I - I_2 + \alpha_2 N \alpha_1 I M_n I_3}{h}$$

$$I_{s2}(e^{-sv}-1) = \frac{\alpha_1 N M_p I_1 - I_2 + \alpha_2 N M_n I_3}{h}$$

$$I_{s3}(e^{sv_3}-1) = \frac{\alpha_1 N \alpha_2 I M_p I_1 - \alpha_2 I I_2 + [(\gamma_2 - \alpha_1 N \alpha_1 I) M_p + (1-\gamma_2) M_n] I_3}{h}$$

$$h = (\gamma_2 - \alpha_1 N \alpha_1 I) M_p + (1 - \alpha_2 N \alpha_2 I - \gamma_2) M_n$$

$$s = \frac{q}{kT}$$

特性が高抵抗か低抵抗かを定める量は $\alpha_1 N$ 及 $\alpha_2 N$ で、

$\alpha_1 N + \alpha_2 N < 1$ ……高抵抗

$\alpha_1 N + \alpha_2 N > 1$ ……低抵抗

となり、これは接合 J_2 のそれぞれ逆方向、順方向バイアス状態に相当する。

2-2 高インピーダンス領域

接合 J_2 は逆バイアスで、電流は I_{s2} の高々10倍程度であり、抵抗は大きい。OFF状態に相当する。

2-3 ブレークオーバー電圧

一般式を微分し、 $\partial V / \partial I = 0$ となる電圧である。 V_{BJ_2} に近い電圧となる。

2-4 低インピーダンス領域

接合 J_2 は順方向バイアスに変化し、電圧降下 V_s は単一の pn 接合の順方向の値に近くなる。

2-5 負抵抗領域及 α の電流依存性

$V_0 \sim V_s$ 間は負抵抗となる。また α の電流依存性を生じている数例につき考察する。

2-6 図的解法による $V-I$ 特性

適性な仮定を用いれば、図的にスイッチ特性が得られる。

2-7 各領域でのエネルギー帯図及キャリア分布

4層構造における各領域でのエネルギー帯図の変化及び少数キャリアの分布につき考察する。

第3章 ゲルマニウム pnpn スイッチ

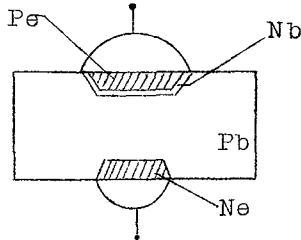
3-1 序 言

シリコン pnpn 素子の動作機構は、その最も重要な部分がシリコン材料の特長に依存している。すなわち少数キャリアによる電流増巾率がシリコン中に存在するトラップ又は再結合中心のために、電流依存性をもっているためであると説明されている。

ゲルマニウムの場合は通常このような性質をもたらすような特殊な構造，形状とせねばならない。著者はこれを3つの方法を用いて解決した。

すなわち

- (1) 電流ドリフト効果
- (2) 偏心構造効果
- (3) 抵抗並列効果



第2図 長いPbをもつpnpn素子

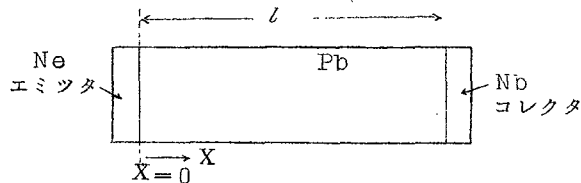
3-2 電流ドリフト効果によるGe pnpn 素子

pnpn 構造は合金拡散法で作つたが，この時第2図に示すようにPbに相当する領域を，この中での少数キャリア即ち電子の拡散距離に比して長くなるように作る。この拡散距離は一般に約150μ程度である。実験的にはPbの長さが270μ以下であると $\alpha_{2N} > 0.1$ となり，又，Nbは極くうすくて $\alpha_{1N} \approx 0.9$ であるから，この場合高抵抗領域があらわれない。

逆にPbをあまりに厚くすると， α_{2N} が0.1となる電流が非常に大きくなり，特性が悪くなる。

Pb領域が長いと，この中を流れる多数キャリア（正孔）の作る電界のためNeから注入された電子がNb（トランジスタのコレクタに相当）に到達する割合が電流とともに増加することによつて，電流依存性が発生する。

今第3図のように，長いPb領域（=l）をもつトランジスタ（2端子）における α を調べてみると，Pb中を流れる正孔は電界を生じて電子の到達率を増加させる。



第3図 厚いベース領域をもつトランジスタ

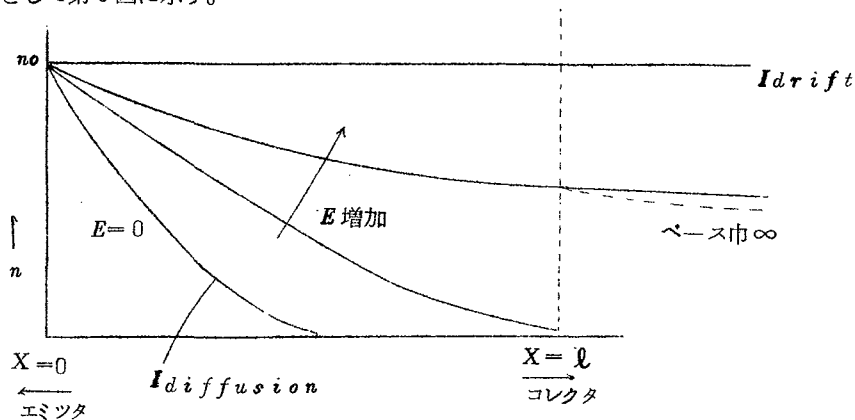
適当な仮定を用いて，連続の式をとき，適当な境界条件を使えば電子による電流は

$$I_n = q \mu_n E e^{-\frac{x}{\mu_n E \tau_n}}$$

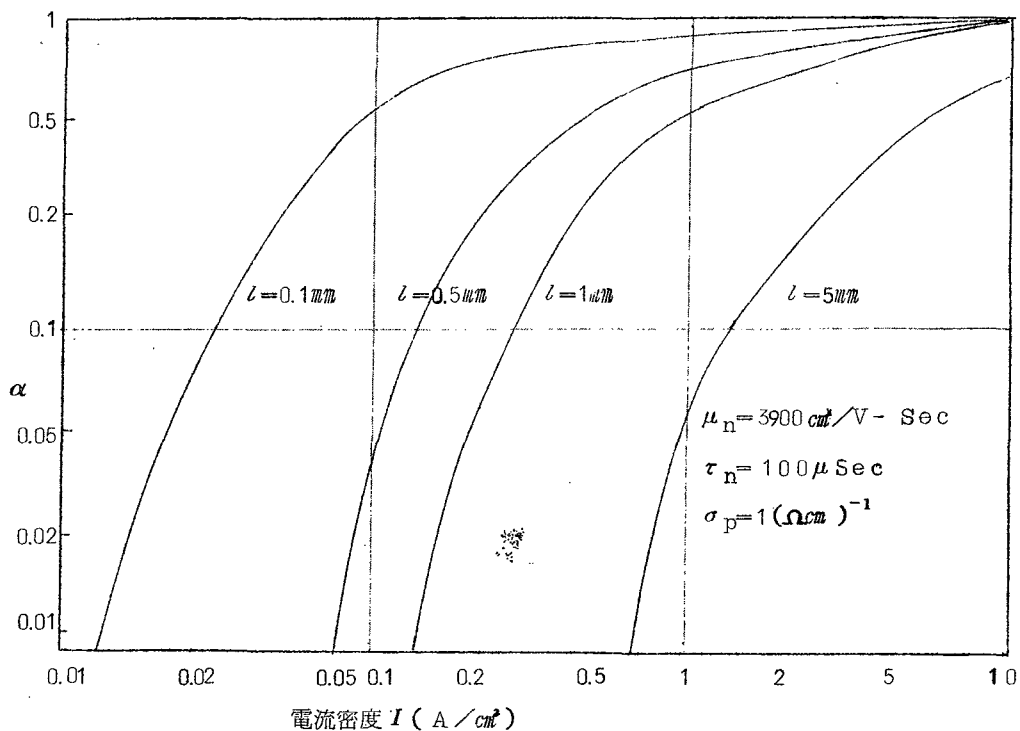
また α は

$$\alpha = \frac{I_n(x=l)}{I_n(x=0)} = e^{-\frac{\sigma_p \cdot l}{\mu_n \cdot I \cdot \tau_n}}$$

ここで σ_p は P_b 領域の伝導度、 I は正孔電流密度、 τ_n は P_b 中の電子のライフタイムである。この場合の電子の分布を定性的に第4図に示し、また電流による α の変化を l をパラメータとして第5図に示す。



第4図 ベース内電子分布



第5図 ドリフト効果による α の変化

拡散電流はドリフト電流に対して無視できるとしたが、これは試作した形状ではよい近似である。

3-3 偏心構造

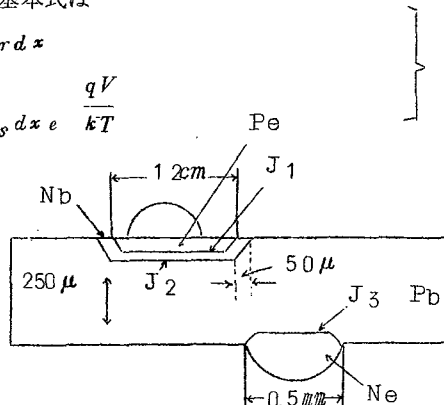
第6図に示すようにpnpn構造を同心的に作らず偏心させると更によい $V-I$ 特性が得られる。

模型的には第7図のように横方向に長いpn接合をもつた構造における α の電流依存性を考える。この構造を等価的にかき換えると図(b)のようになる。

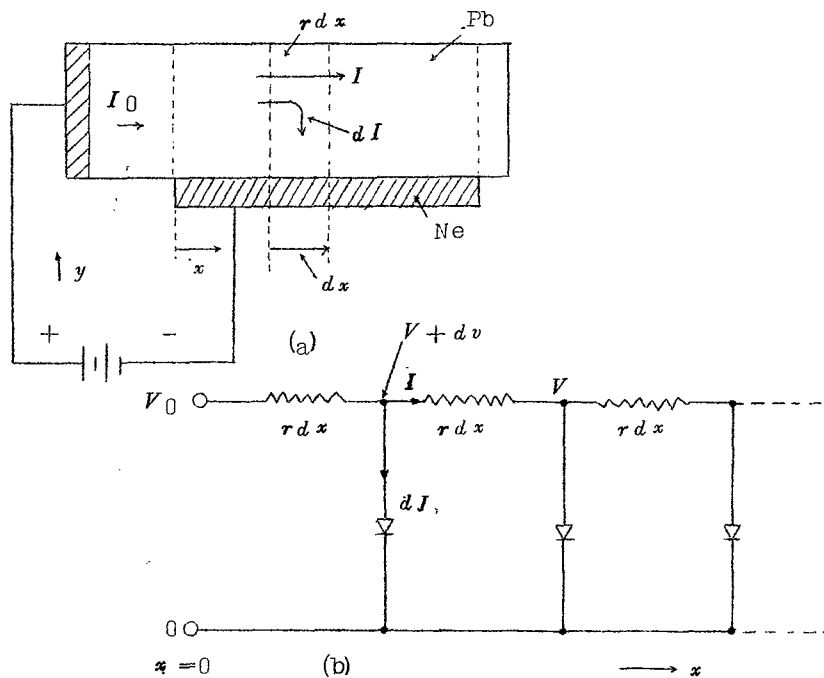
この場合の基本式は

$$dV = I \cdot r dx$$

$$dI = \alpha I_0 dx e^{\frac{qV}{kT}}$$



第6図 偏心構造をもつたpnpnスイッチ



第7図 偏心構造模型と等価回路

この2式より電位分布は

$$x = \sqrt{\frac{2kT}{qraI_s}} \left(-\frac{qV}{2kT} + e^{-\frac{qV_o}{kT}} \right)$$

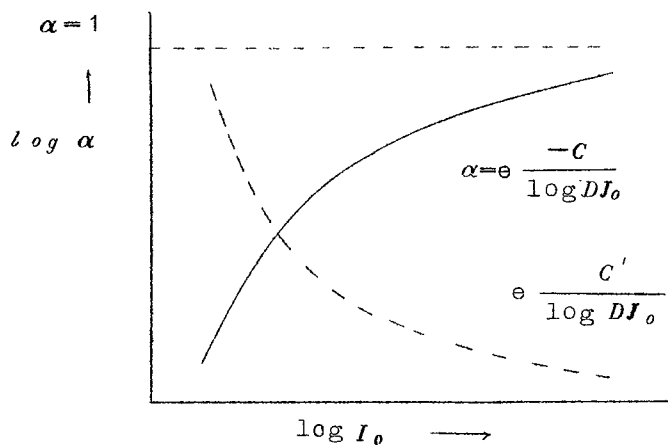
V_o は $x=0$ における電位である。接合の注入効率を γ とし、電界によるドリフト及走行距離を考慮し、適当な近似を用いれば

$$\alpha = \exp - \frac{l^2}{\tau_n \mu_n V_o}$$

また電流に対して

$$\alpha = \exp - \frac{C}{l_o g D I_o}$$

C, D は定数。第8図にこれを示す。



第8図 電流依存性

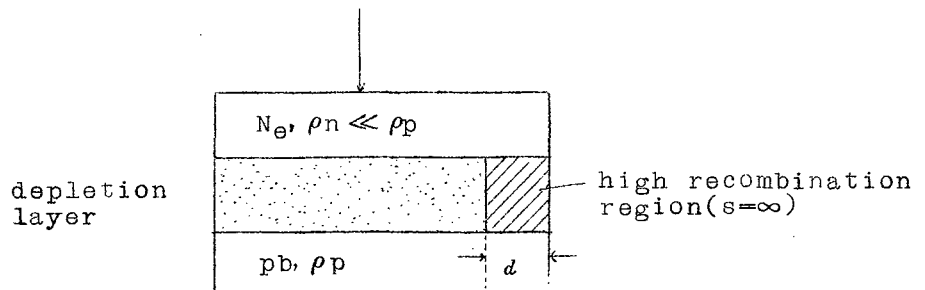
3-4 抵抗並列効果を用いた pnpn 素子

エミッタ接合のうちの1つの特性を変化させてスイッチ特性を得る方法を見出した。実際には金属線を接合にふれさせて容量の放電電流を流したり、機械的に一部分を破壊（たとえばダイヤモンドペンで切りこみを入れる）することで行なう。

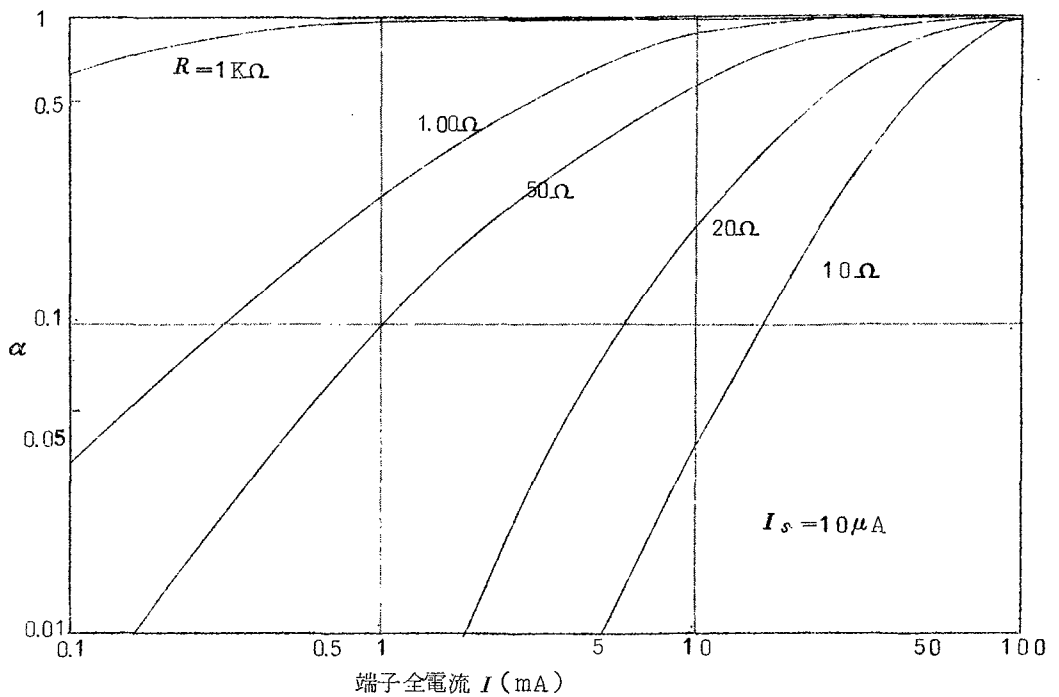
第9図のように接合の一部に高再結合の通路ができている時、等価的には図(b)のようになり、ひろがり抵抗を考えれば

$$\alpha = \frac{\gamma R}{\frac{kT}{qI} \ln \frac{I}{I_s} + R}$$

$$\frac{kT}{qI} \ln \frac{I}{I_s} + R$$



第9図 抵抗並列接合の模型



第10図 抵抗並列効果による α 変化

となり、これを R をパラメータとして第10図に示す。

3-5 合金拡散法を用いた pnpn 構造の製作

4層構造は著者の開発した合金拡散法によつて、pnpn を作り、もう一つをn型合金で製作した。

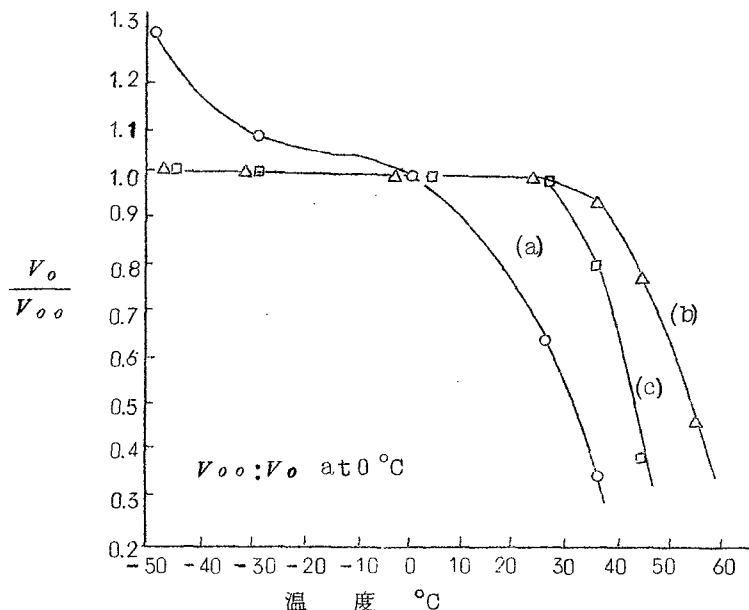
合金拡散用材料は Sb を3%程度含む In で、標準的には $350^{\circ}C$ 10分でWetさせ、 $750^{\circ}C$ で10分、 $700^{\circ}C$ で20分の拡散をおこなつた。拡散n型層の厚さは約 5μ であり、再結晶p型と拡散層間の注入効率は殆んど1に近い。

拡散后、2端子特性によつてその成否が知れる。 α は0.95以上になる。合金は Sb 10%入りの Pb を $750^{\circ}C$ で合金する。

3-6 試作 npn 素子の諸特性

以上3つの方法による npn 構造はいずれも類似の特性をしめすが、主として α の電流依存性によつて多少変化する。第11図はブレイクオーバー電圧の温度による変化を示す。(a)(b)(c)はそれぞれブレイクオーバーの起つている状態がやゝ異なるものである。

第1表にはシリコン素子とゲルマニウム素子の定性的な比較をしめす。



第11図 V_o の温度変化

第1表 SiとGeの比較

	Si npn	Ge npn
特性を示す上の主な効果	トラップによる α の電流依存性	1) 電流ドリフト効果 2) 抵抗並列効果
ピーク電圧を決めている要素	J_2 の電子なだれ降服	1) J_2 の電子なだれ降服 2) $\alpha_1 N + \alpha_2 N$ の値
温度による変化	小	大
I_o	小	大
V_s	$\sim 1V$	$\sim 0.5V$

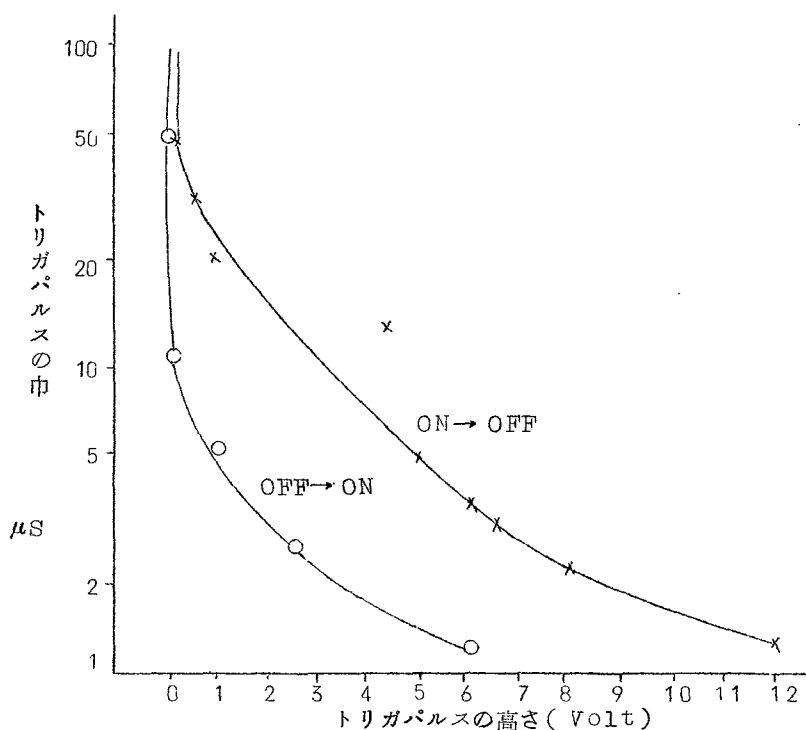
3-7 スイッチング動作

一般に負抵抗を有する素子では、負荷抵抗のえらび方で3種の動作をする。npn に於ても無安定 (astable), 単安定 (monostable), 2安定 (bistable) の各動作が可能であり、実際にも安定に動作する。

pnpn の特性から見て、最も有用なものは2安定スイッチで、トリガ入力が一に入ることによって安定状態を変え、記憶、論理動作及電力用などに適している。

トリガパルスの中が短くなつて来ると、スイッチを行なうためには高さをより必要とする。この状態の一例を第12図に示す。ON→OFFの方が大きいエネルギーを要するのは、ベース領域内のキャリア蓄積によるものである。

2端子素子での2安定動作では最高スイッチ速度を測定するのは難かしいが、ON→OFFで1 μ S以下である。



第12図 スイッチング可能なパルス

第4章 高速度3端子pnpnスイッチ

4-1 序 言

前章でも述べたように、一般のpnpn スwitchはその動作機構に対して、電流増巾率の電流による変化を必要としている。この性質によつて特性がほぼ決まり、また構造もある程度制限される。

この章で述べる3端子素子はこれらと異なり、電流増巾率の変化は不要である。第3電極に加えた電圧によつて注入すべき接合を強制的に逆バイアスして注入を阻止し、回路電流のある点で急激に注入を開始してON状態とする。等価的には電流増巾率が階段状に変化すると考えてもよい。このため非常に急峻な特性をしめし、するどいピークをもつ。

この結果次のような特長を持ち、高速動作に適していると考えられる。

- (1) ブレークオーバー電圧を外部電源によつて変化させた時、他の3端子形式のものでは I_0 がそれによつて変化する。しかしこの素子では V_0 だけが独立に変化して I_0 に影響しない。このため他素子では製作時に於て定められた V_0 だけしか実用上使えないが、本素子では任意の V_0 を実現できるから応用範囲がひろく、小信号レベルのスィッチングに適している。
- (2) ドリフト効果等の必要性から Nb, Pb 領域を厚く作る必要が全くなく、充分薄い領域も使用できるのでスィッチング時間の短縮に対して非常に有効である。これは高周波トランジスタの薄いベース層と対比して考えられる。
- (3) pnpn の動作速度を制限するのは主として ON \rightarrow OFF へのスィッチである。この場合スィッチ速度は ON 状態で流れている電流が多いほど遅い。この素子では他のものと比べてごく小さい、数 μ A 程度の I_1 を持つているから ON 電流をごく小さくでき、高速動作が期待できる。

4-2 3端子 pnpn スィッチの構造

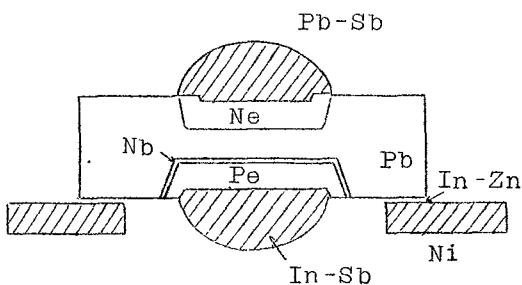
第13図に構造を示す。前章の素子と同様に合金拡散法を用いて作るが、Pb 領域から電極を取出し、また Pb 領域も出来るかぎり薄く作る。このため α_{1N} , α_{2N} とも相当に大きく、 $\alpha_{1N} + \alpha_{2N}$ は充分1をこえている。

外部より Pb に電圧を印加することによつて α_{1N} 又は α_{2N} のいずれかを0とするのが動作原理といえよう。

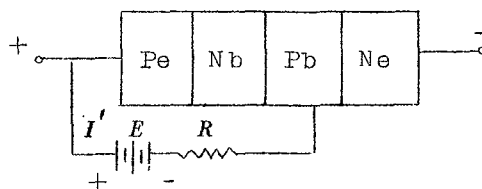
4-3 電源接続Iの特性

第3電極にかかる電源の帰路によつて接続に2種類が考えられる。いずれでもスィッチ特性はあらわれるが特性自体は異なる。

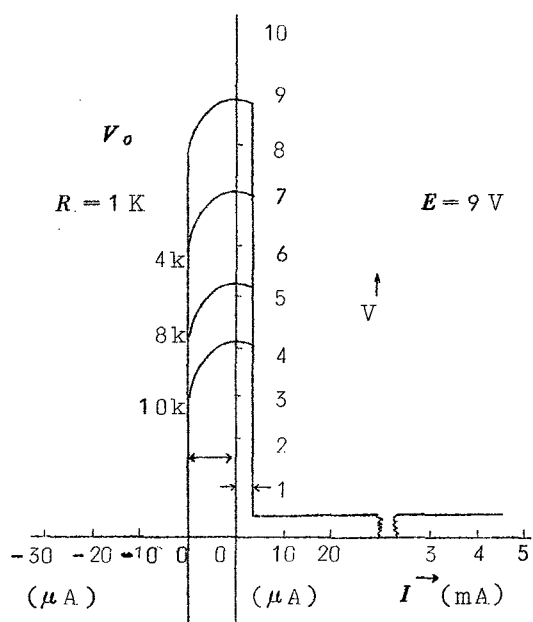
第1の方法は第14図に示すように Pe ~ Pe 間に、Pe が+となる方向に E 及び R を入れる。この場合の特性を第15図に示す。特長は I_0 及 I_1 が非常に小さいこと、又第16図のように E 及 R によつて V_0 が大巾に変化できることである。 V_0 を変化させても、 I_0 が変化しないことも他の素子と異なる。



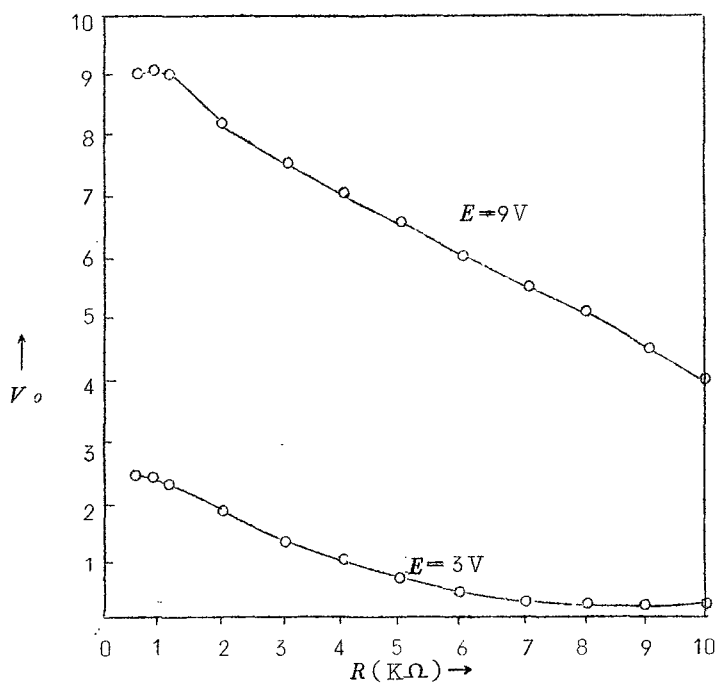
第13図 3端子 pnpn の構造



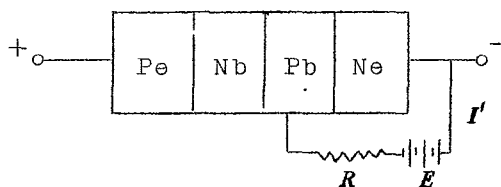
第14図 電源接続その1



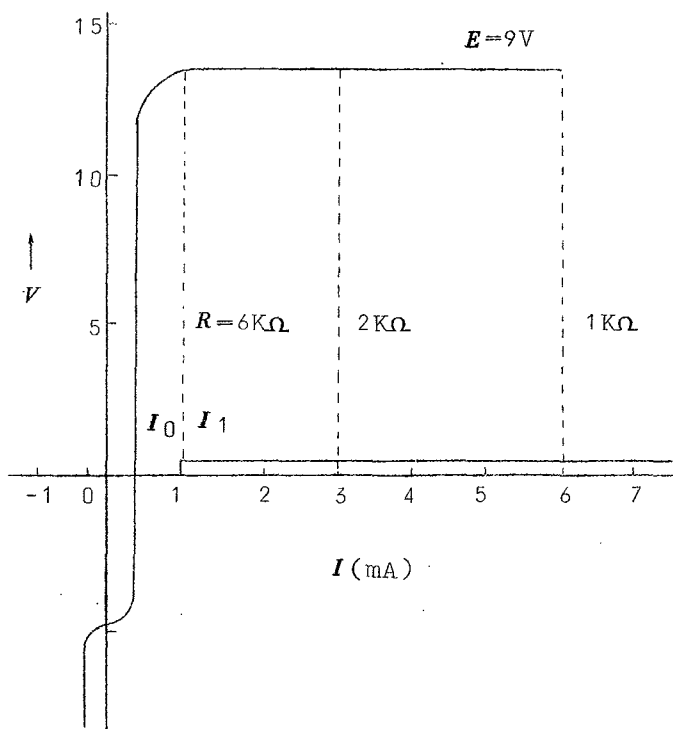
第15図 持続 I の特性



第16図 R による V_o の変化



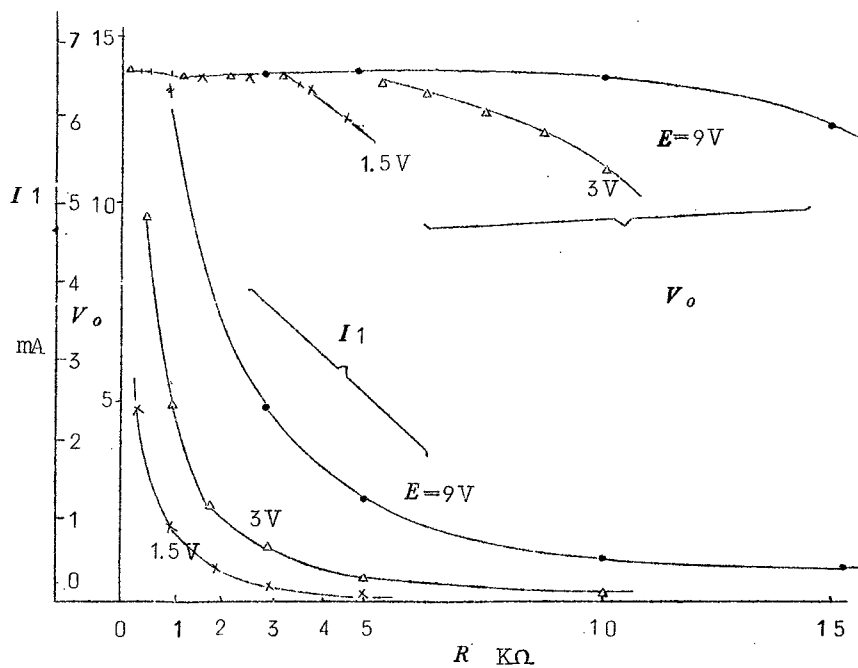
第17図 接続法そのⅡ



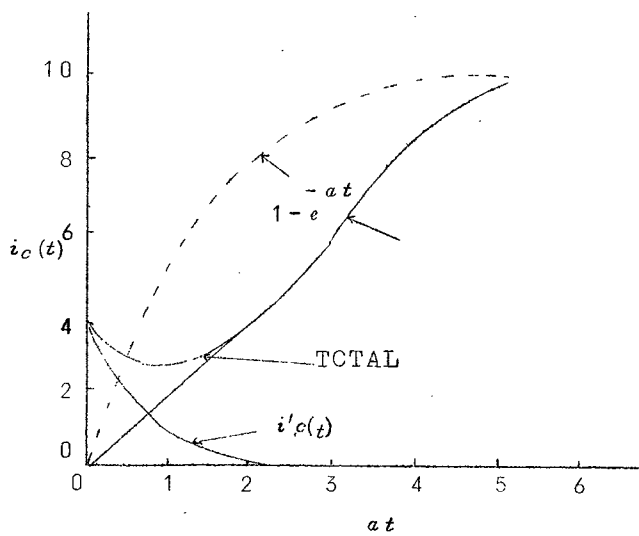
第18図 接続法Ⅱにおける特性

4-4 電源接続Ⅱの特性

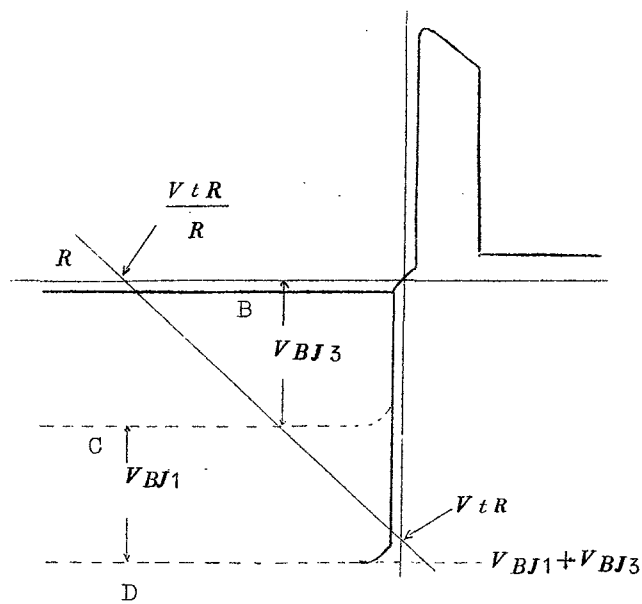
この場合は第17図のようにPb～Ne間に E ， R を接続する。特性は第18図。この時の特長は V_0 はほとんど V_{BJ_2} に等しくなつて、 E にあまり関係しない。しかし I_1 は R によつて大きく変化する。第19図に R を変えた場合の V_0 及 I_1 の変化を示す。



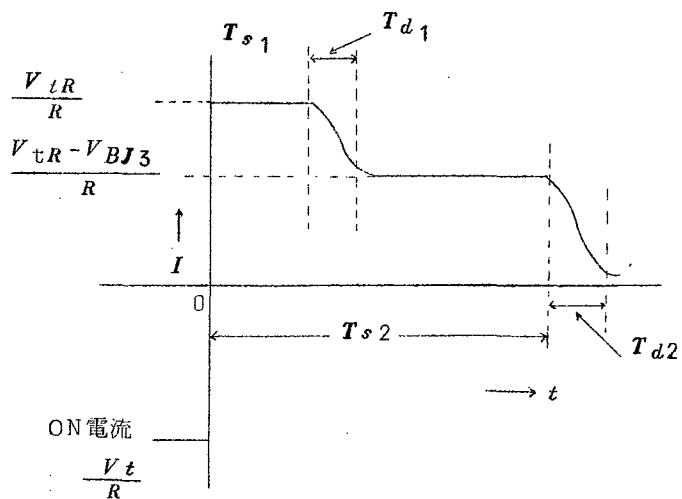
第19図 R, E による V_o, I_1 の変化



第20図 電流応答波形



第 2 1 図 VI 特性とスイッチ OFF



第 2 2 図 スwitch の OFF 定性的波形

4-5 2 安定および単安定スイッチ

高速スイッチの見地からは、接続Ⅰの方が有利である。Pb 領域の厚さを変化させると、予想された如く薄いほどスイッチ時間が早くなる。

2 安定動作の場合のスイッチ時間はON、OFF共に $0.1 \mu s$ 以下と云えるが、バイアス状態、回路条件等で相当に影響される。

単安定スイッチを行なわせると、トランジスタのスイッチにやゝ似てくるので、より正確なスイッチの性能を知ることが出来る。

高速スイッチングに関しては測定方法に対しても充分検討が加えられねばならず、本論文では一次的測定のみを行つて可能性を指摘するにとどめた。

素子製作法を合金法のほかに拡散法を用い、メサやプレーナ構造とすればさらに高速度のスイッチ素子が実現可能であろう。

第5章 pnpn ダイオードのスイッチ特性

接合トランジスタに関するスイッチング動作の解析を基礎として、これにpnpn 構造の特長を考慮して定性的にスイッチング特性の解析を試みた。

5-1 電圧スイッチと電流スイッチ

pnpn ダイオードをスイッチON させる場合、ブレイクオーバー電圧 V_o 以下のトリガパルスでもスイッチする事がある。これを電流スイッチと呼ぶが、これは接合容量の充電々流によつて起り、パルスの立上りが早いほど大きい電流が流れる。

ピークの電流は

$$i_p = \frac{VC}{T} (1 - e^{-aT})$$

となる。

5-2 上昇時間

接合型トランジスタと対比させて等価回路を考えるとStep function Voltage に対して

$$i(t) = \frac{\Delta V_t}{r_b + R} \left[e^{-\frac{(V_b + R)}{\omega r_e}} \right] + \frac{R \Delta V_t}{r_e^2} [1 - (1 + at) e^{-at}]$$

これを図示すれば第20図の如くなる。第一項はエミッタの拡散容量の充電々流である。

5-3 OFF 時間

トランジスタの場合と同様にベース領域内のキャリア蓄積効果を考えれば、2つのベースのうち、どちらか一方が先に飽和を脱する筈である。これをVI 特性上で考えると第21図のようになり、時間に対しては第22図のように変化して2段飽和特性を示す。

トランジスタの場合と同じく蓄積時間を求めることができ、これは順及び逆方向カットオフ

周波数， α_N ， α_I ，ON 状態の電流などに依存する。

結 言

以上，ゲルマニウムを用いた pnpn 構造のスイッチ素子について原理，製法，特性等につき述べた。

今後更に回路技術者との協力で pnpn 系の素子がその応用面を開発されるべきであろう。

容 査 結 果 要 旨

半導体を用いたpnpn スイッチは、現在シリコン制御整流器として広く電力用に用いられている。しかし、この種スイッチを電子計算機、電子交換機の回路素子として利用するための努力は、その重要性にもかかわらずあまり行なわれていない。本論文は、安定な制御整流器すらできていなかった昭和33年頃より一貫して行なってきた研究をまとめたものである。

第1章では、pnpn スイッチの重要性とpnpn スイッチの現在までの発展の歴史をのべ、第2章では、通常用いられるなだれ特性と電流到達率の電流増加によるpnpn スイッチの特性を式を用いて解析し、さらに、これらの関係が図的に与えられた場合にも同様にスイッチ特性が得られることを示した。第3章では、シリコンが偶然含んでいた再結合中心となる不純物によつて電流到達率が電流の関数であつたためにスイッチ特性が得られたが、ゲルマニウム中では不純物が少いために適当な電流到達率特性が得られずスイッチとならないことから、スイッチ特性を持たせるためにいろいろな方法を提案して検討している。まず、一層を厚くして電流が増した時、抵抗によつて電位降下を生ずるようにして到達率を変える方法を提案し、設計理論を与え試作を行なつて成功している。第二に2つの電極を偏心させて作る方法についてのべ、簡単な設計理論を展開している。第三に、エミッタとベースの間を抵抗で短絡してスイッチ特性を出す方法についてのべ、設計理論をたて接合の一部を放電または機械的に破壊する方法を実施し、試作を行なつて検討した。さらに、これらの試作に合金拡散法を適用することを提案して従来の気相拡散法を簡略にし、試作したpnpn スイッチについて理論と実験とから特性の利害を論じ、特に高速度スイッチ用としての検討を加えて100 μ sec 程度のパルスを発生させている。第4章では、さらに第3電極をベースにつけ加えて逆方向バイアス電圧を変えスイッチさせることを提案し検討を加え、これが特性制御と高速度化に特にすぐれていることをのべ、試作したスイッチでは1 μ sec まで優に動作することを示した。第5章は、pnpn スイッチのスイッチ動作を理論的に解析したもので特性を改良するため構造をどのようにするかを論じている。

以上を要するにスイッチ特性の現われ難かつたゲルマニウムを用いてpnpn スイッチを試作する方法を提案し、結果としてゲルマニウムに限らずシリコンはもちろん、他の半導体に適用できるpnpn スイッチの製造原理を作り上げ、さらにその高速度化について論じたもので、特に工業化に至らなかつたのは惜しまれるが、いち早く厚いベースを持つたpnpn スイッチを提案した業績は、高く評価さるべきであり、多くの示唆に富み電子工学に貢献するところは大きい。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。